

Виконано експериментальні дослідження аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб при поперечному їх обтіканні в діапазоні чисел Рейнольдса $2000 < Re_{d_i} < 30000$. Встановлений вплив геометричних та режимних параметрів на аеродинамічний опір пакетів. Запропоновано узагальнені співвідношення для розрахунку опору пакетів. Показано, що коефіцієнт CS і показник степені n при числі Рейнольдса в рівнянні подібності залежать від геометричних характеристик пакету та труб

Ключові слова: плоскоовальна труба, шаховий пакет, аеродинамічний опір, вплив, розрахунок, узагальнені співвідношення

Выполнены экспериментальные исследования аэродинамического сопротивления шахматных пакетов плоскоовальных труб при поперечном их обтекании в диапазоне чисел Рейнольдса $2000 < Re_{d_i} < 30000$. Установлено влияние геометрических и режимных параметров на аэродинамическое сопротивление пакетов. Предложены обобщенные соотношения для расчета сопротивления пакетов. Показано, что коэффициент CS и показатель степени n при числе Рейнольдса в уравнении подобия зависят от геометрических характеристик пакета и труб

Ключевые слова: плоскоовальная труба, шахматный пакет, аэродинамическое сопротивление, влияние, расчет, обобщенные соотношения

УДК 536.24:533.6.011

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.55529

АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ З АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ ПАКЕТІВ ПЛОСКООВАЛЬНИХ ТРУБ

Є. М. Письменний

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: evgnik@i.com.ua

В. А. Кондратюк

Асистент*

E-mail: komandirVA@i.ua

О. М. ТерехКандидат технічних наук,
старший науковий співробітник*

E-mail: teram57@meta.ua

О. І. Руденко

Кандидат технічних наук, доцент**

E-mail: a_rudenko55@mail.ru

О. В. Баранюк

Кандидат технічних наук, старший викладач*

E-mail: teram57@meta.ua

*Кафедра атомних електричних станцій
і інженерної теплофізики

**Кафедра економіки і підприємництва

***Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Важливим кроком у напрямі поліпшення теплоаеродинамічних характеристик трубчастих теплообмінних пристроїв є впровадження в їх конструкції труб зручнообтічної форми (овальних, плоскоовальних, двохкутових, каплеподібних). Проте до теперішнього часу не існує надійних розрахункових залежностей для визначення аеродинамічного опору пакетів таких труб в широкому діапазоні змінення їх режимних та геометричних характеристик, що ускладнює їх використання в енергомашинобудуванні.

З урахуванням вищесказаного в НТУУ «КПІ» (м. Київ, Україна) проведені експериментальні дослідження аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб в широкому діапазоні зміни режимних параметрів, геометричних характеристик труб і пакетів та виконано узагальнення експериментальних даних.

Актуальність роботи полягає в тому, що ефективність плоскоовальних поверхонь у 1,5 рази більше, ніж

ефективність поверхонь у вигляді пакетів з круглих труб. Тому, при однакових витратах енергії на прокачування теплоносія крізь теплообмінні поверхні тепловий потік у плоскоовальних поверхонь на 25...40 % (залежно від числа Рейнольдса) вище, ніж у поверхні із круглих труб. Таким чином, використання плоскоовальних поверхонь теплообміну дозволяє на 20...30 % знизити масогабаритні характеристики теплообмінних апаратів.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Дослідженням аеродинамічного опору пакетів профільованих труб присвячена невелика кількість робіт [1–4]. Відомі дослідження в основному виконані на одиночних трубах і направлені на вивчення впливу геометрії профілю труб на їх теплоаеродинамічні характеристики [5–7].

Останнім часом з'явилося декілька робіт [8], в яких наводяться результати експериментальних і число-

вих досліджень в основному теплообміну коридорних пакетів плоскоовальних труб, а дослідженням і особливо узагальненню даних з аеродинамічного опору не приділено практично ніякої уваги. Дослідження [9] проведені в досить вузькому діапазоні зміни режимних параметрів при низьких числах Рейнольдса $Re=250-800$.

В роботі [10] встановлено, що аеродинамічний опір одно- двох- і трьохрядних пакетів зручнообітчних труб пластинчасторебристого теплообмінника на 30 % менший, ніж для пакетів круглих труб.

Автори роботи [11] прийшли до висновку про доцільність використання плоскоовальних труб в якості поверхонь нагріву і, насамперед, з можливістю зниження аеродинамічного опору і металоємкості теплообмінних поверхонь, однак вплив геометричних характеристик плоскоовальних труб і пакетів на аеродинамічний опір в цій роботі взагалі не розглядався.

Аналіз приведеної інформації дозволяє зробити наступні висновки.

Практично відсутні дослідження впливу геометричних характеристик плоскоовальних труб та кроків між ними на аеродинамічний опір. Результати числового моделювання експериментально не підтверджені. У відомих роботах немає системних досліджень, вони містять уривчасті дані, не мають ніяких розрахункових співвідношень і носять, як правило, окремий характер.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є отримання нових експериментальних даних з аеродинамічного опору в компактних плоскоовальних трубчастих теплообмінних поверхнях, виявлення їх залежності від розмірів вісей труб, від кроків між зазначеними трубами у масиві, а також створення методики розрахунку аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб в широкому діапазоні геометричних і режимних характеристик, необхідної для проектування ефективних рекуперативних теплообмінних апаратів типу „газ-рідина”, „газ-газ”.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

- дослідити аеродинамічний опір шахових пакетів плоскоовальних труб;
- визначити вплив на аеродинамічний опір швидкості потоку W , геометричних факторів: поперечного S_1 та повздовжнього кроків S_2 між трубами, відношення повздовжнього до поперечного розміру труби (відносне подовження профілю) d_2/d_1 ;
- отримати узагальнені залежності для розрахунку аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб.

4. Результати досліджень аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб та їх аналіз

Дослідження аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб при поперечному їх обтіканні повітряним потоком здійснювалися на експериментальній установці, що представляє собою аеродинаміч-

ну трубу розімкнутого типу прямокутного перетину за методиками, що докладно описані в роботах [12, 13].

Дослідження виконані для чотирьох типів труб ($d_2/d_1= 2; 2,5; 3,4; 5,0$) в області змін чисел Рейнольдса $Re_{d_1} = 2 \cdot 10^3 \dots 30 \cdot 10^3$. Вивчалися комбонування з числом поперечних рядів труб $z_2=7$. В кожному поперечному ряді, в залежності від поперечного кроку між трубами S_1 , знаходилось від 3 до 7 труб.

Загалом експериментами охоплено 50 пакетів труб, геометричні характеристики яких наведені в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Геометричні характеристики пакетів труб типів 1, 2

Номер Розм.	S_1 , мм	S_2 , мм	S_1/S_2	H/F	Номер розм.	S_1 , мм	S_2 , мм	S_1/S_2	H/F
Труба типу 1 ($d_2/d_1=2,0$)					Труба типу 2 ($d_2/d_1=2,5$)				
101	30	45,0	0,667	5,14	201	30	45,0	0,667	6,14
102	30	55,5	0,541	5,14	202	30	55,5	0,540	6,14
103	30	70,0	0,428	5,14	203	30	70,0	0,428	6,14
104	35	36,5	0,959	3,86	204	35	45,0	0,777	4,61
105	35	45,0	0,777	3,86	205	35	55,5	0,631	4,61
106	35	55,5	0,631	3,86	206	35	70,0	0,500	4,61
107	35	70,0	0,500	3,86	207	42,0	36,5	1,151	3,41
108	42,0	36,5	1,151	2,86	208	42,0	45,0	0,933	3,41
109	42,0	45,0	0,933	2,86	209	42,0	55,5	0,757	3,41
110	42,0	55,5	0,757	2,86	210	42,0	70,0	0,600	3,41
111	42,0	70,0	0,600	2,86	211	52,5	36,5	1,438	2,46
112	52,5	36,5	1,438	2,06	212	52,5	45,0	1,167	2,46
113	52,5	45,0	1,167	2,06	213	52,5	55,5	0,946	2,46
114	52,5	55,5	0,946	2,06	214	52,5	70,0	0,750	2,46
115	52,5	70,0	0,750	2,06					

Таблиця 2

Геометричні характеристики пакетів труб типів 3, 4

Номер розм.	S_1 , мм	S_2 , мм	S_1/S_2	H/F	Номер розміщ.	S_1 , мм	S_2 , мм	S_1/S_2	H/F
Труба типу 3 ($d_2/d_1=3,4$)					Труба типу 4 ($d_2/d_1=5,0$)				
301	30	70,0	0,428	7,94	401	30	80,0	0,375	11,14
302	35	55,5	0,631	5,96	402	35	80,0	0,437	8,36
303	35	70,0	0,500	5,96	403	42,0	55,5	0,757	6,19
304	42,0	36,5	1,151	4,41	404	42,0	70,0	0,600	6,19
305	42,0	45,0	0,933	4,41	405	42,0	80,0	0,525	6,19
306	42,0	55,5	0,757	4,41	406	52,5	45,0	1,167	4,46
307	42,0	62,5	0,672	4,41	407	52,5	55,5	0,946	4,46
308	42,0	70,0	0,600	4,41	408	52,5	70,0	0,750	4,46
309	42,0	80,0	0,525	4,41	409	52,5	80,0	0,656	4,46
310	52,5	55,5	0,946	3,18					
311	52,5	62,5	0,840	3,18					
312	52,5	70,0	0,750	3,18					

За визначальний розмір в числах Рейнольдса приймався поперечний розмір труби d_1 . За розрахункову швидкість повітря в числах Re і Eu приймалася швидкість в найбільш вузькому поперечному перетині пакета.

Втрати тиску визначалися по різниці статичних тисків ΔP до і після пакету з урахуванням втрат на тертя у проточній частині стенда [12]. За величинами ΔP визначалися числа Ейлера, які віднесені до одного поперечного ряду пакету.

$$Eu_0 = \frac{\Delta P}{\rho \cdot W^2 \cdot z_2} \quad (1)$$

Отримані дослідні дані, що подані на рис. 1–4, свідчать про доцільність узагальнення отриманих результатів ступеневими залежностями виду:

$$Eu_0 = C_s \cdot Re_{d_1}^{-n} \quad (2)$$

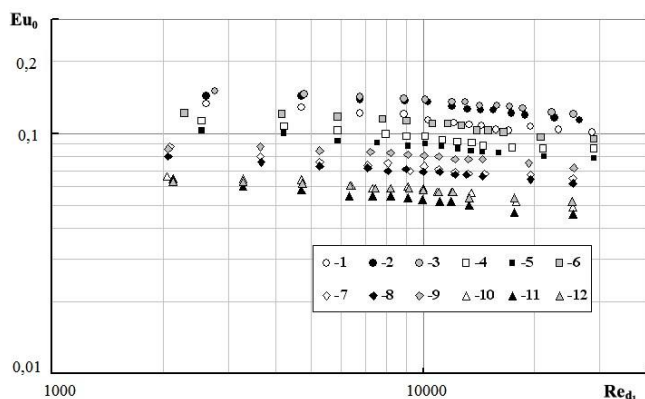


Рис. 1. Результати дослідження аеродинамічного опору пакетів труб типу 1: 1 – пакет № 101; 2 – № 102; 3 – № 103; 4 – № 104; 5 – № 105; 6 – № 107; 7 – № 108; 8 – № 109; 9 – № 111; 10 – № 112; 11 – № 113; 12 – № 115

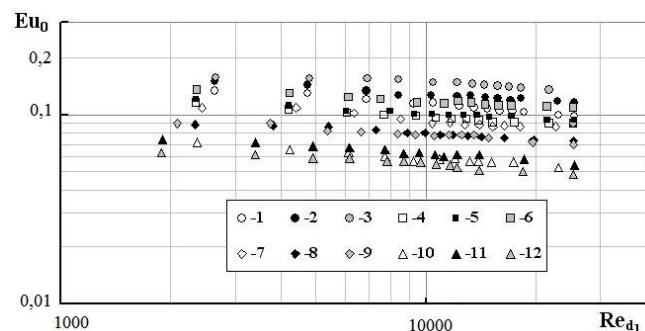


Рис. 2. Результати дослідження аеродинамічного опору пакетів труб типу 2: 1 – пакет № 201; 2 – № 202; 3 – № 203; 4 – № 204; 5 – № 205; 6 – № 206; 7 – № 207; 8 – № 208; 9 – № 210; 10 – № 211; 11 – № 212; 12 – № 214

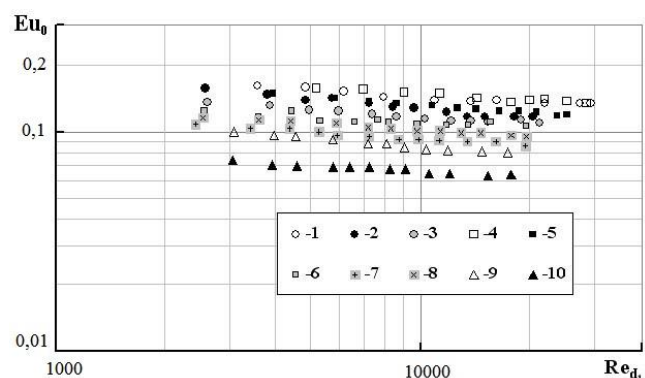


Рис. 3. Результати дослідження аеродинамічного опору пакетів труб типу 3: 1 – пакет № 301; 2 – № 302; 3 – № 303; 4 – № 304; 5 – № 305; 6 – № 306; 7 – № 308; 8 – № 309; 9 – № 310; 10 – № 312

При обробці і аналізі експериментальних даних та залежностей чисел Ейлера від чисел Рейнольдса велика увага приділялася факторам, які можуть впливати на аеродинамічний опір пакетів. Виявлено декілька

таких факторів: поперечний крок між трубами S_1 , поздовжній крок S_2 , приведена довжина поверхні H/F [2, 13] (відношення площі поверхні одного поперечного ряду пакета до поперечного прохідного перерізу для проходу потоку між трубами) та відношення поздовжнього до поперечного розміру труби (відношення подовження профілю) d_2/d_1 .

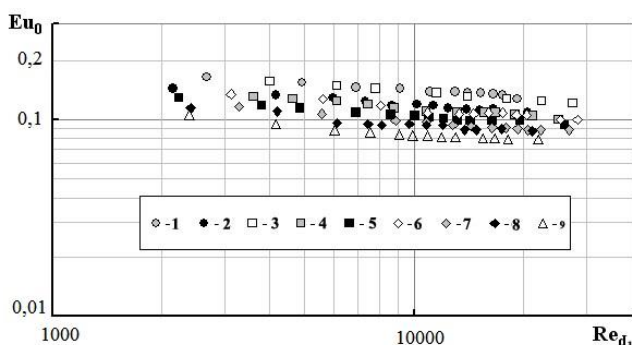


Рис. 4. Результати дослідження аеродинамічного опору пакетів труб типу 4: 1 – пакет № 401; 2 – № 402; 3 – № 403; 4 – № 404; 5 – № 405; 6 – № 406; 7 – № 407; 8 – № 408; 9 – № 409

З аналізу отриманих даних залежностей чисел Ейлера від Рейнольдса виявилося, що прослідкувати залежність аеродинамічного опору краще всього від відношення поперечного до поздовжнього кроків між трубами S_1/S_2 . Параметр S_1/S_2 , як ідентифікатор розміщення труб у пакеті, має переваги в порівнянні з відносними кроками S_1/d_1 , S_2/d_2 , так як скорочує число змінних в узагальнюючих формулах, підвищує їх точність і універсальність. В якості другого параметру, що впливає на опір, виявився параметр H/F (для пакетів плоскоовальних труб $H/F = [\pi d_1 + 2 \times (d_2 - d_1)] / (S_1 - d_1)$, який враховує геометричні характеристики труб та захащення каналу.

Зростання чисел Рейнольдса призводить до зменшення чисел Ейлера за степеневим законом (співвідношення (2)) для всіх досліджених пакетів труб (рис. 1–4). Для виявлення впливу на аеродинамічний опір геометричних факторів на рис. 5, 6 приведені залежності чисел Ейлера від факторів S_1/S_2 та H/F .

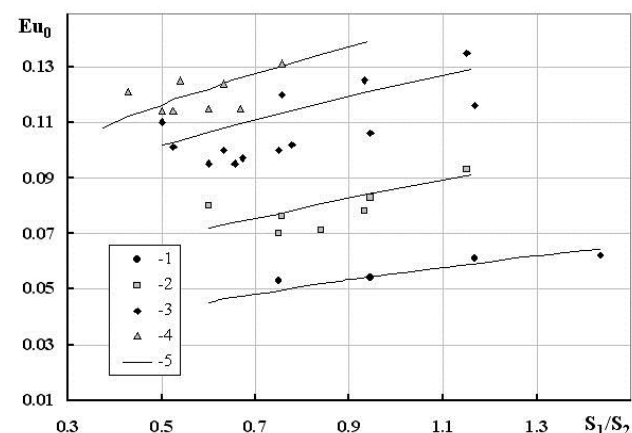


Рис. 5. Залежність чисел Ейлера від параметра S_1/S_2 при $Re_{d_1} = 12000$: 1 – $H/F=2,46$; 2 – $H/F=3,3$; 3 – $H/F=4,5$; 4 – $H/F=6,0$; 5 – апроксимуючі криві

Наведені на рис. 5 дані залежностей $E_{u0}=f(S_1/S_2)$ свідчать, що збільшення S_1/S_2 призводить до зростання аеродинамічного опору на 25–35 % в усьому діапазоні значень S_1/S_2 від 0,4 до 1,4. Простежується розширювання (групування) даних за приведеною довжиною поверхонь Н/Ф. Зростання цього параметру (зменшення поперечного кроку і збільшення відносного подовження профілю d_2/d_1) характеризується збільшенням аеродинамічного опору.

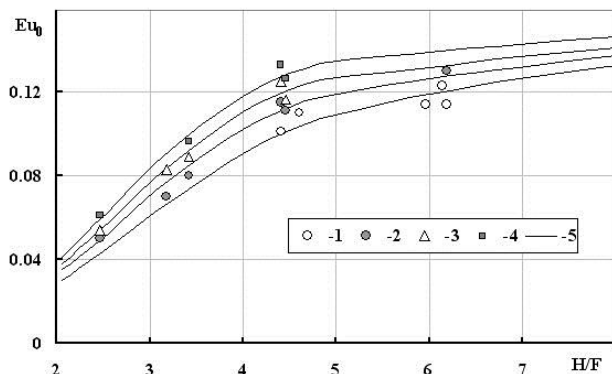


Рис. 6. Залежність чисел Ейлера від параметра Н/Ф при $Re_{d1} = 12000$: 1 – $S_1/S_2=(0,5-0,54)$; 2 – $S_1/S_2=0,75$; 3 – $S_1/S_2=(0,93-0,95)$; 4 – $S_1/S_2=(1,15-1,17)$; 5 – апроксимуючі криві

Дані, які представлені на рис. 6, свідчать, що залежність чисел Ейлера від Н/Ф являється функцією, в основі якої лежить гіперболічний тангенс. Зростання параметра Н/Ф від 2,5 до 5 супроводжується різким зростанням аеродинамічного опору в 2,5–3 рази, далі для величин $H/F > 5$ зростання опору сповільнюється і складає всього 20–25 %.

Аналіз даних не підтвердив залежність аеродинамічного опору від відносного подовження профілю d_2/d_1 в явному вигляді.

З проведеного аналізу випливає, що для якісного узагальнення експериментальних даних з аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб, у якості узагальнених безрозмірних геометричних параметрів слід використовувати відношення кроків S_1/S_2 та приведену довжину поверхні Н/Ф.

Аналіз експериментальних даних показав зміну показника степені n та C_S в рівнянні 2 як у межах з постійними значеннями приведеної довжини Н/Ф при $S_1/S_2 = \text{var}$, так і для пакетів з однаковими параметрами розміщення S_1/S_2 при $H/F = \text{var}$ (рис. 7, 8). В охоплених вимірами діапазонах геометричних і режимних характеристик показник степені n у формулі (2) змінюється від 0,075 до 0,15 та C_S від 0,11 до 0,49.

Стає очевидним, що геометрія труб і параметри їх розміщення надають істотного впливу на величину показника степені n та C_S . Це свідчить про необхідність урахування в узагальнюючих залежностях для n і C_S параметрів розміщення труб S_1/S_2 та приведеної довжини поверхні Н/Ф.

Варіювання геометричних характеристик пакетів у широкому діапазоні їх зміни дозволило визначити, що залежність $n = f(S_1/S_2, H/F)$ при $H/F = \text{const}$ може бути описана степеневою функцією, а залежність показника степені n від приведеної довжини Н/Ф при $S_1/S_2 = \text{const}$

являє собою гіперболічний тангенс. Збільшення значень параметрів розміщення S_1/S_2 та Н/Ф за інших рівних умов супроводжується зростанням значень показника степені n . Залежність величин коефіцієнтів C_S від параметру Н/Ф підпорядковується також закону „гіперболічного” тангенсу.

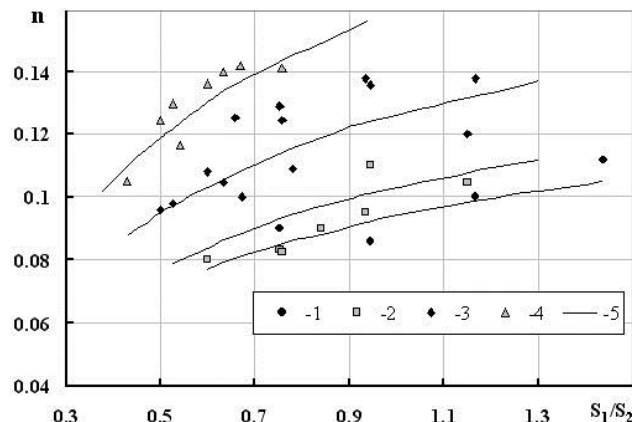


Рис. 7. Залежність показника степені n від параметра розміщення S_1/S_2 : 1 – $H/F=2,5$; 2 – $H/F=3,3$; 3 – $H/F=4,5$; 4 – $H/F=6,0$; 5 – апроксимуючі криві

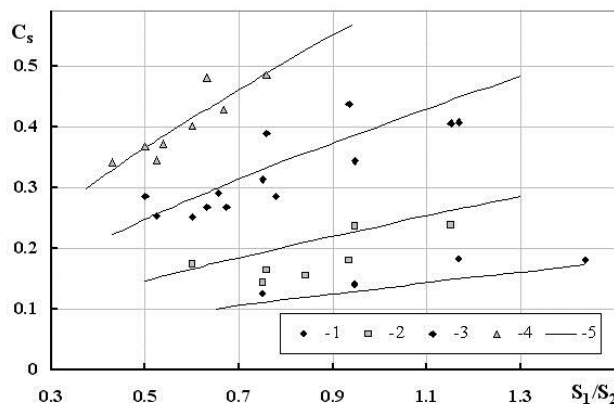


Рис. 8. Залежність коефіцієнта C_S від параметра S_1/S_2 : 1 – $H/F=2,5$; 2 – $H/F=3,3$; 3 – $H/F=4,5$; 4 – $H/F=6,0$; 5 – апроксимуючі криві

Розрахункові залежності n і C_S від відібраних параметрів можна представити у вигляді двох множників, які є функціями S_1/S_2 , H/F і можуть бути представлені наступними загальними виразами:

$$n = F_1(S_1/S_2) \cdot F_2(H/F), \quad (3)$$

$$C_S = F_3(S_1/S_2) \cdot F_4(H/F). \quad (4)$$

Математична обробка залежностей рис. 7, 8 дає наступні співвідношення для визначення $F_1(S_1/S_2)$ та $F_3(S_1/S_2)$:

$$F_1(S_1/S_2) = (S_1/S_2) \cdot (7 \cdot S_1/S_2 + 3,5)^{-1}, \quad (5)$$

$$F_3(S_1/S_2) = (S_1/S_2)^{0,7}. \quad (6)$$

Для визначення функцій $F_2(H/F)$ та $F_4(H/F)$ на рис. 9, 10 представлені значення комплексів

$n_{\text{досл}}/F_1(S_1/S_2)$ ($F_2(H/F)$) і $C_{S \text{ досл}}/F_3(S_1/S_2)$ ($F_4(H/F)$) в залежності від приведеної довжини H/F . Отримані дані добре апроксимуються функціями гіперболічного тангенсу.

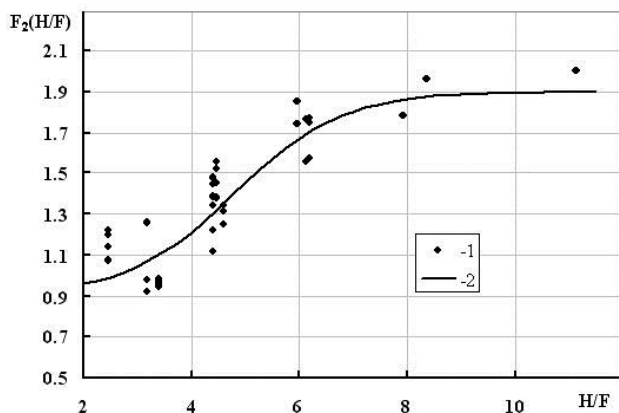


Рис. 9. Залежність $F_2(H/F)$ від H/F : 1 – дослідні значення; 2 – розрахункова крива

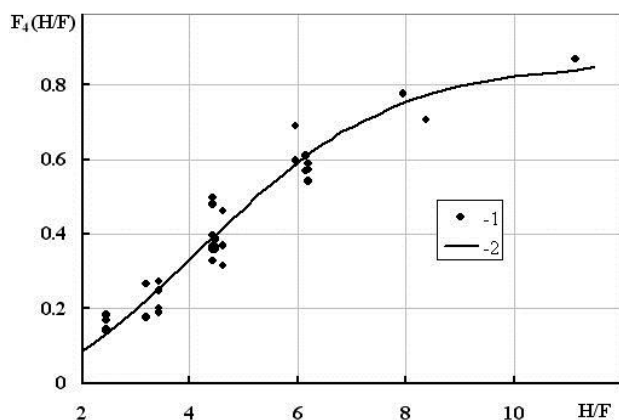


Рис. 10. Залежність $F_4(H/F)$ від H/F : 1 – дослідні значення; 2 – розрахункова крива

Оброблення даних рис. 9, 10 дають наступні співвідношення для розрахунків $F_2(H/F)$ та $F_4(H/F)$:

$$F_2(H/F) = k_1 \cdot \text{th}[0,5(H/F - 4,9)] + 1,4, \quad (7)$$

$$F_4(H/F) = k_2 \cdot \text{th}[0,27 \cdot (H/F - 4,2)] + 0,36, \quad (8)$$

де k_1 та k_2 – емпіричні коефіцієнти.

У підсумку для розрахунку значень показника степеня n при числі Рейнольдса в формулі (2) та коефіцієнта C_S пропонується використовувати наступні залежності:

$$n = (S_1/S_2) \cdot (7 \cdot S_1/S_2 + 3,5)^{-1} \times [k_1 \cdot \text{th}[0,5 \cdot (H/F - 4,9)] + 1,4], \quad (9)$$

$$C_S = (S_1/S_2)^{0,7} \cdot [k_2 \cdot \text{th}[0,27 \cdot (H/F - 4,2)] + 0,36]. \quad (10)$$

Таким чином, для розрахунку аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб при значеннях відносної довжини профілю d_2/d_1 (2,0–5,0), приведеної довжини H/F (2–11) і параметра розміщення S_1/S_2 (0,375–1,45) в області чисел Рейнольдса Re_{d_1} (2×10^3 – 3×10^4) пропонуються залежності (2), (9) і (10).

Оцінка точності узагальнюючих формул (2), (9), (10) здійснювалася зіставленням дослідних Eu_d і розрахункових Eu_p значень чисел Ейлера при граничних числах Рейнольдса $Re_{d_1} = 2000$ і $Re_{d_1} = 30000$ за формулою

$$\Delta = [(Eu_d - Eu_p) / Eu_p] \cdot 100\%. \quad (11)$$

Результати цієї оцінки, виконаної на основі масиву експериментальних даних для 50 досліджених пакетів показали, що розбіжність Δ між дослідними і розрахунковими значеннями чисел Нуссельта не перевищує $\pm 20\%$.

5. Висновки

1. Аеродинамічний опір пакетів залежить від геометричних параметрів труб та захаращення ними прохідного перерізу каналу, що враховуються приведеною довжиною H/F , та від крокових характеристик між трубами пакету, що враховується параметром розміщення S_1/S_2 .

2. Експериментальні дані з дослідження опору узагальнені залежностям, що включають числа Рейнольдса, приведену довжину H/F і параметр розміщення S_1/S_2 .

3. Отримані експериментальні дані, а також емпіричні співвідношення для розрахунку аеродинамічного опору шахових пакетів плоскоовальних труб можуть бути застосовані для теплоаеродинамічних розрахунків нових високоефективних теплообмінних апаратів при їх проектуванні.

Література

1. Антуфьев, В. М. Теплопередача и аэродинамические сопротивления трубчатых поверхностей в поперечном потоке [Текст] / В. М. Антуфьев, Г. С. Белецкий. – М.-Л.: Машгиз, 1948. – 119 с.
2. Кэйс, В. М. Компактные теплообменники [Текст] / В. М. Кэйс, А. Л. Лондон. – М.: Энергия, 1967. – 224 с.
3. Антуфьев, В. М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева [Текст] / В. М. Антуфьев – М.-Л.: Энергия, 1966. – 184 с.
4. Бурков, В. К. Исследование теплообмена и аэродинамики пучков из овальных труб [Текст] / В. К. Бурков, В. П. Медведский, И. Ю. Кочегарова, Ю. И. Лафа // Теплоэнергетика. – 2010. – № 3. – С. 42–45.
5. Hasan, A. A. Thermal-hydraulic performance of oval tubes in a cross-flow of air [Text] / A. A. Hasan // Heat and Mass Transfer, accepted for publication. THP 2004 by author and THP 2004 Springer-Verlag. By permission, 2004. – P. 1-32.
6. Жукова, Ю. В. Аэродинамика и теплообмен плоскоовального цилиндра при вынужденной конвекции [Текст] / Ю. В. Жукова, А. М. Терех, А. В. Семеняко. // Труды V Российской Национальной конференции по теплообмену. – 2010. – Т. 2. – С. 126–128.
7. Жукаускас, А. А. Конвективный перенос в теплообменниках [Текст] / А. А. Жукаускас. – М.: Наука, 1982. – 472 с.

8. Tahseen, T. A. A numerical study of forced convection heat transfer over a series of flat tubes between parallel plates [Text] / T. A. Tahseen, M. Ishak, M. M. Rahman // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. – 2012. – Vol. 3. – P. 271-280.
9. Zeinab, S. A.-R. Heat Transfer Characteristics and Fluid Flow past Staggered Flat-Tube Bank Using CFD [Text] / S. A.-R. Zeinab // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. – 2013. – Vol. 7, Issue 10. – P. 842–848.
10. Ishak, M. Experimental investigation on heat transfer and pressure drop characteristics of air flow over a staggered flat tube bank in crossflow [Text] / M. Ishak, T. A. Tahseen, Md. Mustafizur Rahman // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2013. – Vol. 7. – P. 900–911.
11. Tahseen, T. A. An experimental study of air flow and heat transfer over in-line flat tube bank [Text] / T. A. Tahseen, M. M. Rahman, M. Ishak // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 9. – P. 1487–1500.
12. Кондратюк, В. А. Аэродинамическое сопротивление поперечно-омываемых шахматных пакетов плоско-овальных труб [Текст] / В. А. Кондратюк, В. Е. Туз, А. М. Терех, Ю. В. Жукова, А. Ж. Мейрис // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3/8 (57). – С. 39–42. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/4074/3740>
13. Письменный, Е. Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб [Текст] / Е. Н. Письменный. – Киев: Альтерпрес, 2004. – 244 с.

Запропонована нова конструкція регулюючого відсіку циліндру високого тиску парової турбіни К-325-23,5, виконаного з використанням радіального паророзподілення, що призначена для забезпечення часткових режимів роботи парової турбіни. Наведено візуалізація течії та інтегральні характеристики розробленої проточної частини, а також виконано аналіз особливостей фізичних процесів, що виникають при радіальному підводі пари

Ключові слова: парова турбіна, регулююча ступінь, радіальна парціальність, паророзподілення, просторова турбулентна течія

Предложена новая конструкция регулирующего отсека цилиндра высокого давления паровой турбины К-325-23,5, выполненного с использованием радиального парораспределения, предназначенная для обеспечения частичных режимов работы паровой турбины. Приведены визуализация течения и интегральные характеристики разработанной проточной части, а также выполнен анализ особенностей физических процессов, возникающих при радиальном подводе пара

Ключевые слова: паровая турбина, регулирующая ступень, радиальная парціальность, парораспределение, пространственное турбулентное течение

УДК 621.165

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.55527

РАЗРАБОТКА НОВОГО СПОСОБА ПАРЦИАЛЬНОГО ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН

А. В. Русанов

Член-корреспондент НАН Украины,
доктор технических наук, профессор
заместитель директора по научной работе,
заведующий отделом*

E-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua

А. И. Косьянова

Ведущий инженер*

E-mail: akuniver@rambler.ru

Д. Ю. Косьянов

Кандидат технических наук**

E-mail: kosyanov@ipmach.kharkov.ua

*Отдел гидроаэромеханики энергетических машин

**Институт проблем машиностроения

им. А. Н. Подгорного НАН Украины

ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

1. Введение

На сегодняшний день использование мощностей ТЭС осуществляется не только в базовом, но и в маневренных режимах для пиковых и полупиковых

нагрузок потребления электроэнергии. Анализ состояния ТЭС Украины показывает, что существует необходимость замены или реконструкции большей части энергоблоков, которые к настоящему времени отработали свой ресурс, физически и морально уста-